

水下图像传输质量的实时评测模型^{*}

袁 飞, 程 恩

(水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门大学 厦门 361005)

摘 要: 基于 VQM 客观评测模型体系, 提出了一种适合水声及无线信道传输的实时图像质量评测模型。模型基于三个分项参数 (结构损伤、空域边缘能量增加、空域边缘能量损耗) 描述水下图像传输中压缩图像和非压缩图像的典型劣化特征。通过这三个分项参数, 可有效地评测水下图像的劣化程度, 统计实验表明, 本实时评测模型具有较好的评测准确性、单调性和一致性。同时, 模型利用了奇异值秩可压缩性, 进一步压缩了参考特征的信息量, 节约了实时评测所需的信道资源, 为实现实时评测的业务评测目标提供了新途径。研究表明, 本方法占用的额外信息开销不超过数据信息量的 3%, 对于水声信道、无线信道等资源受限的实时评测应用具有实用价值。此外, 论文设计了基于面积理论的质量网图模型, 通过网图的开闭程度, 形象直观地反映图像质量的好坏, 克服了传统方式在评测结果表达中存在的综合分物理意义不明确等缺陷。本实时评测模型可应用在水下监测、海底勘探等水下图像通信场合, 具有较好的应用前景。

关键词: HVS 特征参数; 图像质量; 客观评价

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520 2050

Real-time evaluation model for the transmission quality of under water image

Yuan Fei, Cheng En

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of
Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract The paper proposes a real-time image quality evaluation model which is based on the VQM quality evaluation system. The model is suitable for underwater and wireless applications. The model adopts three parameters, i.e. structure error, energy augment and energy expense, to describe the distortion of the compressed or uncompressed images, and the evaluation model has good evaluation veracity, monotonicity and consistency. The model also takes the advantage of compressing the order of the singular value, which reduces the information of the reference feature, saves the channel resource and provides a new approach to realize real-time evaluation. Research shows that the additional signal cost does not exceed 3% of the total information, so this method is suitable for the applications like underwater acoustic communication or wireless communication with limited channel resource. Besides, the paper also proposes a model that uses triangle image to express the image quality, which overcomes the shortcoming of the confusion in quality score. Experiment shows that the proposed model could be widely used in underwater image communication applications, such as underwater inspection, sea exploration and so on.

Key words HVS feature parameter; image quality; objective assessment

1 引 言

水下图像是水下自治设备的“眼睛”, 具有语音及文

本难以表述的直观效果。随着经济发展和国防建设的需要, 小流量的文本信息已无法满足日益增长的水下业务的发展需求。图像等多媒体业务逐渐成为该领域研究的

热点。代替人实现对画面质量好坏的评估是实现实时评测的最理想目标。在过去的几十年内,许多针对图像质量的客观评测模型被提出,但适合诸如无线信道、水声信道等带宽资源受限条件下的图像质量实时评测模型还非常匮乏。要适合本研究场景的应用,测量模型应符合以下三点基本条件^[1-2]:评测结果应具有准确性、单调性和一致性;评测方式不应过多增加通信数据开销;评测工作不应影响画面质量。

S Wolf和 M. Pinson^[3]提出的一套视频质量测度,通过引入系列参数的方式实现对视频质量的评估。以该理论为基础,由美国 ITS/NTIA 提出的 VQM (Video Quality Metric)模型具有最高 0.9 的主观相似性(最佳情况为 1.0),得到广泛关注。但其评测模型的参数计算相对复杂,且需传递的参数对信道资源占用较多,并不适合直接应用在信道资源有限的水声信道中。

2 实时评测模型的结构

考虑到水声通信的带宽资源限制,必须以最小的额外信息开销换取最好的劣化检测效果。故论文基于 S Wolf和 M. Pinson的 VQM 模型体系(压缩参考,基于辅助信道传递特征参数的方法),提出的劣化检测结构如图 1 所示。发送端在图像信息编码调制前,先对图像信息进行 SVD 分解和边缘分析,提炼出极少信息量的特征参数,并将参数信息以较高保护级别(含编码和调制方法)通过辅助信道与图像信息一同发送。接收端先从数据中提取来自发送端的特征参数信息,同时对接收到的图像信息数据以相同的特征参数提取方法处理。将接收的特征参数(来自发送图像)和计算的特征参数(来自接收图像)送到后续的质量估计结构中进行后续处理^[10-15]。

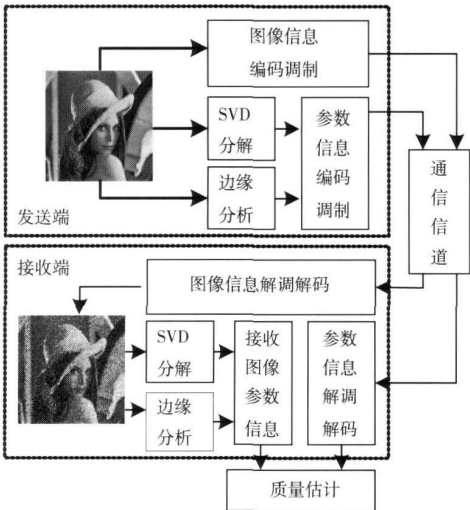


图 1 劣化检测结构框图

Fig 1 The detection structure diagram

3 实时评测模型的设计

根据水声图像劣化的特点,劣化类型可主要划分为三大类别,即:结构劣化类、空域能量增加类;以及空域能量损失类。本研究针对水声图像的上述劣化特点,分别设计三类测度:Stru_Err(用以描述结构劣化的程度),Eng_Add(用以描述空域能量增加的程度),Eng_Dec(用以描述空域能量损耗程度)。

3.1 结构劣化程度测量

德州大学奥斯汀分校 Wang Zhou 等提出的 MSSM 算法用以测量图像的结构性劣化,从而评估画面质量,具有较广泛的影响力^[4-7]。但算法需要完整的参考素材,并不适合本研究的应用背景。A. Shnayderman^[8]论证了奇异值在图像质量评测中的性能,提出的 M-SVD 方法可用以度量多种图像劣化形态。骞森^[9]等讨论了奇异值秩个数对质量评测性能的影响,说明在一定范围内减少秩个数对精度的影响有限。上述研究结论为本研究的结构劣化检测提供了依据。由于奇异值表达的是素材的本征特性,对结构类变化具有较好的特异性。鉴于上述特点,本研究用图像的奇异值作为结构性劣化的测度。设 $Sv(p) = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p\}$ 是随图像信息数据一起传递来的发送图像的奇异值向量, $Hv(p) = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_p\}$ 是从接收图像信息数据中计算得到的接收图像的奇异值向量。其中, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p > 0$, $\delta_1 \geq \delta_2 \geq \dots \geq \delta_p > 0$ 。式 (1) ~ (2) 可得结构劣化的数值化参数。

$$Q \lg sw = \frac{180}{\pi} \times \arccos \frac{\sum_{i=1}^p (Sv \times Hv)}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (Sv \times Sv)} \sqrt{\sum_{i=1}^p (Hv \times Hv)}} \tag{1}$$

$$Stru_Err = \frac{\lambda}{\xi + (Q \lg sw)^2} \tag{2}$$

式中: λ ξ 是拟合因子。定义结构性劣化的分项测度 Stru_Err 其值归一化分布在 (0~1) 之间。值靠近 1, 表示结构劣化轻, 质量好; 靠近 0 表示结构劣化严重, 质量差。在本研究中, 分项测度 Stru_Err 用以对结构性损伤的画面进行度量, 因此对奇异值的秩选择可相对放松要求。

3.2 空域能量损耗测量

空域能量损耗可体现为画面出现模糊、震铃等边缘能量的退化现象^[11]。ITS/NTIA 模型中提出了利用非“垂直-水平”向(记为 \overline{HV})的边缘区能量以度量边缘模糊和方块效应。先将素材经边缘滤波器,在一定角度范围内统计 HV 向和 \overline{HV} 向的像素能量均值,并通过二者的比值作为画面质量的测度^[12]。其方法仅能笼统度量边缘能量的变化,无法区分具体的劣化类型。考虑到模糊等

现象主要体现在边缘区的能量减少,其区别于方块效应的最大特点是不论 HV 或 \overline{HV} ,在原素材的边缘区能量均呈现一致的损耗特性。为排除方块效应对 HV 向边缘能量的影响,选择 \overline{HV} 向边缘能量分析画面的能量损耗测量。在发送端,对原图像先进行边缘滤波,而后依据 ITS/NTIA 的 \overline{HV} 定义方法,计算 \overline{HV} 边缘区的能量统计量(记为 Eng_Src_nHV),如式(3)所示,其中 std_{sc} 表示针对原图像的 \overline{HV} 标准方差。

$$Eng_Src_nHV = std_{sc}[\overline{HV}(i,j)] \quad (3)$$

将该值作为参数传递到接收端。接收端以同样处理方式计算 \overline{HV} 边缘区的能量统计量(记为 Eng_Hrc_noHV),如式(4)所示,其中 std_{hrc} 表示针对劣化图像的 \overline{HV} 标准方差。

$$Eng_Hrc_nHV = std_{hrc}[\overline{HV}(i,j)] \quad (4)$$

二者的传递参数比可用以界定模糊程度,定义如式(5)所述。比值靠近 1,表示能量损耗低,质量好;靠近 0 表示能量损耗大,质量差。

$$Eng_Dec = \left| 1 - \frac{Eng_Hrc_nHV}{Eng_Src_nHV} \right| \quad (5)$$

3.3 空域能量增加测量

空域能量增加可体现为画面出现诸如方块效应、椒盐噪声等现象。不论画面是方块效应还是椒盐噪声,信道对原图像的传输劣化在统计意义上等概的。即画面 \overline{HV} 和 HV 向的数据实际上可理解为与相同信道传递函数在时域上实现卷积。在劣化图像中的 HV 向能量有两种来源可能^[12-13]: 1)是原图像 HV 向能量经信道传递后的能量累计; 2)是由于方块效应等劣化造成的新的 HV 向劣化增加。可通过对原图像 HV 向的边缘能量预测,并将结果与劣化图像的 HV 向边缘能量进行对照,评估方块效应的影响。

具体方法是:发送端在计算 \overline{HV} 边缘区的能量统计量的同时,亦以类似方法计算 HV 向边缘区的能量统计量(记为 Eng_Src_HV)。将该值作为参数传递到接收端。接收端以同样处理方式先计算出 HV 向边缘区的能量统计量(记为 Eng_Hrc_HV)。利用式(5)粗略估算出的传递因子,对来自发送端的 Eng_Src_HV 进行加权,加权方式如式(6)所示。

$$Eng_Src_HV_{pred} = Eng_Dec \times Eng_Src_HV \quad (6)$$

式中: $Eng_Src_HV_{pred}$ 表示根据传递因子预测得到能量值,表示画面自身 HV 方向上的能量 (Eng_Src_HV) 在信道传输后的能量情况。如果画面还存在方块效应等劣化,则接收图像的 HV 向能量 (Eng_Hrc_HV) 将会出现新的增益。因此,通过二者的差值可定量描述由信道造成的 HV 向能量。上述过程如式(7)所述。

$$Eng_Add = \frac{|Eng_Hrc_HV - Eng_Src_HV_{pred}|}{Eng_Src_HV_{pred}} \quad (7)$$

式(7):的结果经过非线性拟合,映射到 0~1。靠近 1,表示能量增加小,质量好;靠近 0 表示能量增加多,质量差。

3.4 质量估计模型

传统图像评测模型(特别是多参数模型)大多以主观测量分为依据,以某单一数值的形式表达画面质量(如归一化到 0~5 区间)。这种单一数值的表达形式虽然符合主观感受特点,但各分量参数在加权集中过程中的系数选择相对困难,且无法通过综合分值细化了解具体的影响因素。为此,作者在质量估计的结构设计中提出以“质量网图”形式表达图像的质量,由质量网图的开闭程度,界定图像的综合质量。以本应用为例,构建正三角形的质量网图,结构如图 2 所示。

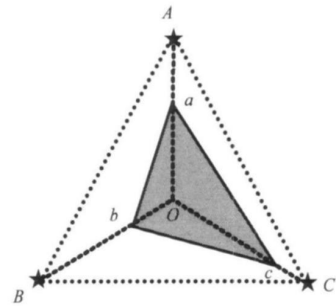


图 2 质量估计结构框图

Fig 2 Structure diagram of quality evaluation

由 A, B, C 三个顶点构成的外围三角形表示画面的最佳质量(本文最佳分量为 1 Q 即图 2 中 $OA = OB = OC = 1.0$)。其中 AB, BC, AC 分别表示顶点之间的边长(本例中 $AB = BC = AC = 3^{1/2}$), P 为三角形 ABC 的半周长。

$$Aera(AB, BC, AC) = \sqrt{P \cdot (P - \sqrt{3})^3} \quad (8)$$

由 a, b, c 三个顶点构成的内围三角形(图 2 中的阴影区)表达画面的综合质量,其支撑面积越大表示画面质量越好。其量化表示如式(9)~(12), p 表示内围三角形的半周长。基于上述质量估计体系,其图像的质量分值最终归一化到 0~1 区间,分值越大表示质量越好,表达如式(13)所示。

$$Aera(ab, bc, ac) = \sqrt{p(p-ab)(p-bc)(p-ac)} \quad (9)$$

$$ab = \sqrt{oa^2 + ob^2 + oa \cdot ob} \quad (10)$$

$$bc = \sqrt{ob^2 + oc^2 + ob \cdot oc} \quad (11)$$

$$ac = \sqrt{oa^2 + oc^2 + oa \cdot oc} \quad (12)$$

$$Score = \frac{Aera(ab, bc, ac)}{Aera(AB, BC, AC)} \quad (13)$$

4 实验分析及讨论

实验分析及讨论将围绕“信息开销”和“评测性能”两个方面展开讨论。

4 1 评测模型的信息开销

发送端图像的特征参数要传递给接收端, 因此需要增加额外的信息传输。本模型需要的评测参数有 3 类: 结构劣化评估参数 (用以评估结构化劣化情况); 发送图像 HV 向边缘能量 (用以预测空域能量增加等劣化); 发送图像 HV 向边缘能量 (用以预测空域能量损耗等劣化)。三个分项指标需要大概 5~7 个单位的额外信息开销, 且这样的信息开销在归一化处理后, 不会随图像格式大小的变化而变化, 具有很好的适用性。水声通信中的图像在经过一定处理后, 通常能达到 100:1 以上的压缩比。以一副 QCF(176×144) 分辨率的灰度图像为例, 经压缩后的传输数据量约 253 个单位。本方法占用的额外信息开销实际上也只约占经高压压缩处理后的数据信息的 2.756%。因此, 上述信息开销是经济的, 很适合水声通信、无线通信等带宽资源紧张的评估应用。

4 2 评测模型的评测性能

国际视频质量专家组 (VQEG) 是由 ITU-T 和 ITU-R 联合成立的致力于开展视频质量评测方法研究及标准化工作推动的领域内权威机构。针对视频图像质量评测模型的性能, 其提出了 Pearson 线性相关系数 (准确性的测度), Spearman 秩相关系数 (单调性的测度), 均方根误差 (准确性的测度) 和背离率 (一致性的测度)。研究中对结合水声图像劣化特点, 设计劣化等价及仿真模拟, 如表 1 所示。

表 1 劣化设置方式列表
Table 1 Error configuration

类型	劣化设置方式说明
椒盐噪声类劣化	用数据库中白噪声 (White noise) 近似代替, 或用椒盐噪声近似模拟;
模糊效应类劣化	用数据库中高斯模糊 (Gaussian blur) 近似代替; 或用中值滤波近似代替;
结构性损伤劣化	对水声图像压缩码流的重要参数, 选择性误码
方块效应类劣化	对水声图像压缩码流的非重要参数, 选择性误码

图 3 给出了 “Lena.bmp” (256×256 如图 (a) 所示) 经过仿真后的劣化效果。其中, 图 (b)、图 (c)、是压缩码流中非重要比特损伤造成的方块效应和模糊效应; 图 (d) 是压缩码流中重要比特错误造成的结构性损伤。

利用论文所述的评测方法, 得到的评测数值结果如表 2 所示。从表 2 可见, 评测模型的三分量指标——结构劣化指标 (Stnu_Err)、边缘损耗指标 (Eng_Dec)、边缘增加指标 (Eng_Add)——均可分别表示对应劣化的严重程度。量化值归一化在 (0~1) 的区间, 越靠近 0 表示劣化越严重, 质量越差; 越靠近 1 表示劣化越轻微, 质量越好。

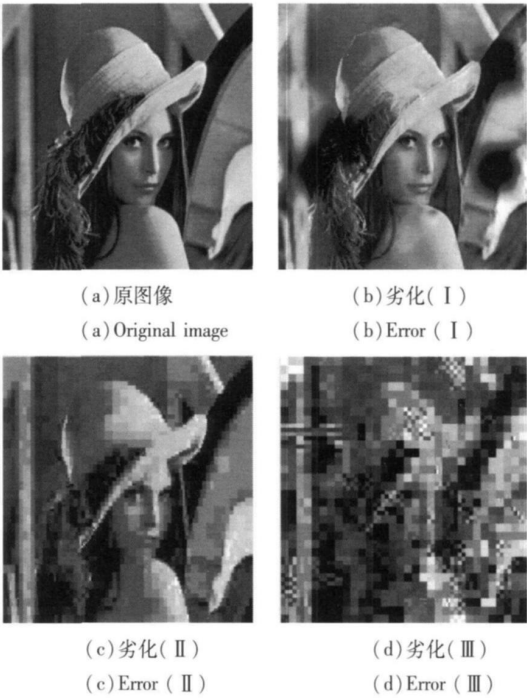


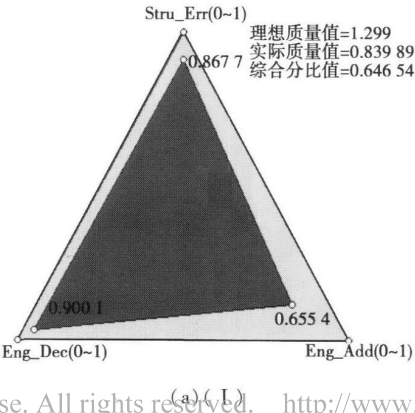
图 3 劣化特征效果图
Fig 3 Error in ages

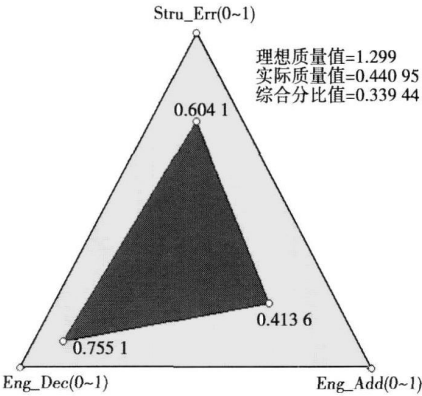
表 2 劣化评测结果对照

Table 2 Comparison table of the detection results

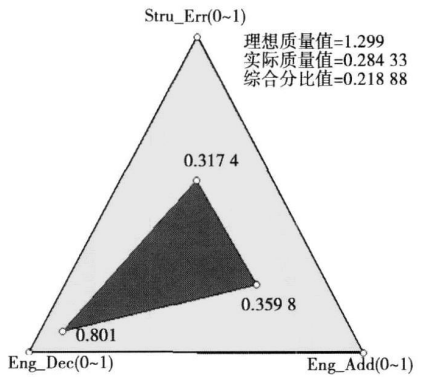
Na	Stnu_Err	Eng_Dec	Eng_Add	Score
iv	0.8677	0.9001	0.6554	0.64654
㊸	0.6041	0.7551	0.4136	0.33944
㊹	0.3174	0.801	0.3598	0.21888

利用论文所述的评测方法, 得到的评测数值结果的质量网图如图 4 可见。质量网图的 “开闭” 程度可形象地表达综合质量分 (Score) 的高低。图 4 中质量网图的外三角形的三个顶点分别表示图像三个质量指标的理想值; 内三角形的三个顶点分别表示图像三个质量指标的实际值。内三角形的三个顶点越靠近外三角形, 表示图像综合质量越好, 反之可推。





(b)(II)



(c)(III)

图 4 图像评测结果的质量网图

Fig 4 Quality score in age for image evaluation

为进一步探讨模型的评测效果,论文以美国德州大学图像和视频工程实验室提供的图像质量估计数据库为参考,基于 VQEG 的四个性能测度探讨模型性能。由于原配的 DMOS 数据并不完全匹配本研究的图像格式和劣化类型。作者将德州大学图像数据库从 RGB 域转化到 YUV 域,并只针对其中亮度分量进行实验。新劣化素材的 DMOS 是以部分原配 DMOS 库为基准参照,利用主观评测工具^[9]设计完成。DMOS 被归一化拟合到 (0~1) 之间,0 表示质量最差,1 表示质量最好。选择不同素材的劣化样本进行测试,对应的散点分布如图 5 所示。用一元函数来拟合已基本可以反映综合值与主观观的映射关系。评测性能的指标如表 3 所示。

表 3 评测性能指标

Table 3 Evaluation performance

Pearson 系数	Spearman 秩系数	偏离率	RMSE
0.863 1	0.874	0.316 7	0.107 14

从统计角度而言,评测模型的评测准确性和单调性均为良好(准确性指标 RMSE=0.107 14, Pearson 相似系数 0.863 1,单调性指标 Spearman 系数 0.874)。存在的

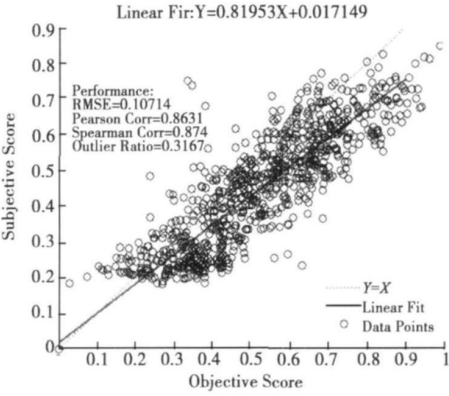


图 5 模型性能散点图

Fig 5 Scatter diagram of the performance

问题是评测一致性 (Outlier Ratio = 0.316 7) 还不是很出色,对个别劣化存在评测盲区(即主观质量较低,评测结果却较高;反之亦然)。究其原因在于本研究的综合质量是由三个分项联合度量。三个分项对综合质量的贡献是等价的。这样虽然可以克服加权系数对结果影响过大的缺陷;但如果某个分量存在盲区,其对结果的负面影响将被等比例地体现出来。如果在带宽资源允许的情况下,可通过增加辅助特征信息量,及新设分项指标的方式,降低分项指标对综合质量的影响,提高评测精度。当然,这是以牺牲一定带宽资源为代价换取的性能提升,因此需根据实际情况权衡设置。

5 结 论

本文介绍了一种适合水下图像通信体系的图像质量实时评测模型。根据水声图像传输过程中常见的四类劣化,设计三个分项指标以分别检测劣化画面,并将检测结果归一化到 (0~1) 的区间。论文设计了基于面积理论的质量网图模型,通过网图开闭程度,形象、直观地反映综合质量的好坏,物理意义明确且便于应用推广。从实验结果可见,本评测模型具有较好的主观相似性,综合评测性能良好。此外,评测方式对原素材的依赖性较低,评测所需的额外信息资源开销不超过数据信息的 3%,非常适合水声通信、无线通信等信道资源有限的评测应用,具有良好的推广价值。

参考文献

[1] VQEG. Final report from VQEG on the validation of objective models of video quality assessment [S]. Phase II 2003

[2] ITU-T. Objective perceptual multimedia video quality measurement in the presence of a full reference ITU-T Recommendation J.247, 2008

- [3] PN SON M, WOLF S. Video performance requirements for tactical video applications [C]. 2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security: Enhancing Critical Infrastructure Dependability. 2007: 85-90.
- [4] WANG Z BOV K, A. C Mean Squared Error: Love It or Leave It? A new look at signal fidelity measures [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 21 (1): 98-117.
- [5] WANG ZH, WU G X, SHE KH H R, et al. Quality-aware images [J]. IEEE transactions on image processing, 2006, 15(6): 1680-1689.
- [6] SHE KH, H R, SABR M F, BOV K, A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms [J]. IEEE Transactions on image processing, 2006, 15(11): 3440-3451.
- [7] LI Q, WANG Z. Reduced-reference image quality assessment using divisive normalization-based image representation [J], IEEE journal of selected topics in signal processing, 2009, 3(2): 202-211.
- [8] SHNAYDERMAN A GUSEV A, et al. An SVD based grayscale image quality measure for local and global assessment [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(2): 422-429.
- [9] 蹇森. 基于奇异值分解的图像质量评价 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 36(4): 643-647, 2006.
QIAN S, ZHU J Y. Image quality measure using singular value decomposition [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 35 (4) : 643-646.
- [10] YUAN F, CHENG E. Reduced-reference metric design for video quality measurement in wireless application [C]. The 11th IEEE International Conference on Communication Technology Proceedings Hangzhou, China, 2008, 641-645.
- [11] 王正友, 胡国胜, 明建华, 等. 基于 SSM 与 ROI 的视频质量评测方法 [J], 仪器仪表学报, 2009, 30 (9): 1906-1911.
WANG ZH Y, HU G SH, MING JH, et al. Video quality assessment based on SSM and ROI [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30 (9): 1906-1911.
- [12] 于江波, 陈后金, 李居明. 视觉选择注意机制模型及其应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22 (4): 100-104.
- YU J B, CHEN H J, LI J P. Model of vision selective attention mechanism and its application [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22 (4): 100-104.
- [13] ENGELKE U, ZEPERNICK H J. Quality evaluation in wireless imaging using feature based objective metric [C]. In Proc. Of IEEE Int. Symp. On wireless pervasive Computing Feb. 2007.
- [14] MIYAHARA M, KOTANI K, ALGAZI V R. Objective picture quality scale (PQS) for image coding [J]. IEEE Trans. Communications, 1998, 46(9): 1215-1225.
- [15] YAMSANG N, Udomhunsakul S. Image quality scale (IQS) for compressed images quality measurement [C]. MECS 2009 International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, 2009, 1(II): 789-794.

作者简介



袁飞, 2002、2005、2008年分别在厦门大学获学士、硕士和博士学位。现为水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室(厦门大学)助理教授。主要研究方向: 水下多媒体信号传输及处理。

E-mail: yuanfei@xmu.edu.cn

Yuan Fei received his bachelor, master and Ph. D. degrees all from Xiamen University in 2002, 2005 and 2008, respectively. Now he is an assistant professor in Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of Ministry of Education, Xiamen University. His research interest is multimedia signal processing and transmission over underwater acoustic channel.



程恩, 1985、1988、2006年分别在厦门大学获学士、硕士和博士学位。现为厦门大学教授, 通信工程系系主任, 博士生导师。主要研究方向为水下通信、数字信号处理。

E-mail: chenger@xmu.edu.cn

Cheng En got his bachelor, master and Ph. D. degrees all from Xiamen University in 1985, 1988 and 2006, respectively. Now he is a professor and supervisor for Ph. D. candidates in Xiamen University. His research interest is underwater acoustic communication and networks.